

学校编码: 10384
学号: 20720081150594

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

部分取向硅钢用铁基合金相平衡的
实验测定与热力学计算

Experimental Determination and Thermodynamic
Calculation of Phase Equilibria in Fe-based Alloys of some
grain oriented silicon steel Systems

郑建平

指导教师姓名: 王 翠 萍 教 授
专 业 名 称: 材料物理与化学
论文提交日期: 2011 年 8 月
论文答辩日期: 2011 年 月
学位授予日期: 2011 年 月

2011 年 8 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

取向硅钢具有优异的软磁性能,饱和磁化强度高,电阻率较高,矫顽力低和铁损小,广泛用于制造软磁材料,在电力工业和电讯工业领域得到了广泛的应用。相图是材料设计的重要理论基础,在金属材料成分设计中有重要应用,因此,有必要掌握取向硅钢的相图和热力学信息。本论文通过实验测定和热力学计算两种途径,对取向硅钢部分铁基相平衡进行了实验测定和热力学计算,主要研究工作如下:

(1) 首次实验测定了 Fe-Nb-Ti 三元系在 1000℃、1100℃和 1200℃时全成分范围的等温截面相图。重新优化计算了 Fe-Ti 二元系相图,基于 Fe-Nb 和 Nb-Ti 两个子二元系的优化结果,利用 CALPHAD 技术,在本研究的实验结果基础上,对 Fe-Nb-Ti 三元系相图进行了热力学优化与计算。

(2) 首次实验测定了 Fe-Si-Ti 三元系在 1100℃和 1200℃, Fe-Si-Nb 三元系在 1200℃时全成分范围的等温截面相图。基于本研究的实验结果和文献报道的实验数据,利用 CALPHAD 技术,在本研究的实验结果基础上,对 Fe-Si-Ti 和 Fe-Si-Nb 两个三元系相图进行了热力学优化与计算。

(3) 基于本研究的热力学计算结果和文献报道的其他二元系和三元系热力学信息,初步建立了 Fe-Si-C-N-Nb-Ti 六元系相图的热力学数据库。利用该数据库计算了取向硅钢的纵断面相图及不同成分取向硅钢平衡凝固时相分数与温度的关系图。

本研究获得的相平衡实验结果以及优化获得的热力学参数,将作为取向硅钢热力学数据库的一个重要组成部分,同时,该研究结果将为取向硅钢的成分设计及制备工艺提供重要的理论依据。

关键词: 取向硅钢; CALPHAD; 相图; 热力学

Abstract

The oriented silicon steel are widely used as soft magnetic materials in the filed of electric power and telecommunication industry due to their good soft magnetism, high saturation manetization and resistivity, small coercive force and iron loss. Phase diagram has been recognized as an important tool in the design of metal materials. Thus, it is necessary to know information of the phase diagram and thermodynamic properties in order to the development of the oriented silicon steel. In the present work, the experimental determination and thermodynamic assessment of phase equilibria in the partial Fe-based alloys of grain oriented silicon steel systems were carried out. Major research contents are listed as follows:

(1) The phase equilibria of the Fe-Nb-Ti ternary system at 1000°C, 1100°C and 1200°C have been experimentally determined for the first time, and reassessed the Fe-Ti binary system was reassessed. Based on the reports of the thermodynamic assessment of the Fe-Nb and Nb-Ti sub-binary systems in ternary Fe-Nb-Ti system, the thermodynamic optimization was carried out by combining the CALPHAD method with the experimental results.

(2) The phase equilibria of the Fe-Si-Ti and Fe-Si-Nb two ternary systems at 1100°C and 1200°C have been experimentally determined for the first time. Based on the reports of experimental data obtained by this work and previous work, the thermodynamic optimization was carried out based on the CALPHAD method.

(3) The thermodynamic database of the Fe-Si-C-N-Nb-Ti system was developed based on the present and previous thermodynamic assessments. Some vertical sections and phase fraction diagrams were calculated based on the present thermodynamic database.

The obtained results in this work can be applied to establish the thermodynamic database of the oriented silicon steel. In addition, the results in this work can provide important theoretical guidance on designing the oriented silicon steel.

Keywords: Oriented silicon steel; CALPHAD; Phase diagram; Thermodynamics

厦门大学博士论文摘要库

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 硅钢概述.....	1
1.1.1 国外硅钢的发展现状.....	2
1.1.2 国内硅钢的发展现状.....	3
1.1.3 取向硅钢中抑制剂的作用.....	4
1.1.4 取向硅钢的生产工艺.....	6
1.2 取向硅钢的性能特点.....	7
1.2.1 合金元素(Fe、Si、C、N)对取向硅钢性能的影响.....	8
1.2.2 微合金元素 Nb 和 Ti 的作用.....	10
1.3 相图及相图计算方法.....	11
1.3.1 相图及其测定方法.....	12
1.3.2 相图计算方法.....	14
1.3.3 相图计算中常用的热力学模型.....	20
1.4 取向硅钢相图.....	24
1.5 本研究的目的和内容.....	25
参考文献.....	26
第二章 实验方法与热力学模型.....	28
2.1 本研究中采用的实验方法.....	28
2.1.1 合金样品的制备.....	28
2.1.2 热处理方法.....	28
2.1.3 显微组织观察.....	29
2.1.4 成分分析.....	29
2.1.5 X-ray 结构分析.....	29
2.2 本研究中采用的热力学模型.....	29

2.2.1 纯组元.....	30
2.2.2 液相和端际固溶体相.....	31
2.2.3 化学计量比化合物相.....	32
2.2.4 金属间化合物溶体相.....	33
参考文献.....	37
第三章 Fe-Nb-Ti 三元系相图的实验测定与热力学优化.....	38
3.1 引言.....	38
3.2 Fe-Nb-Ti 三元系的实验相图信息.....	38
3.2.1 基础二元系.....	38
3.2.2 Fe-Nb-Ti 三元系.....	46
3.3 Fe-Nb-Ti 三元系相平衡的实验测定.....	46
3.3.1 实验方法.....	46
3.3.2 Fe-Nb-Ti 三元系的实验结果与讨论.....	49
3.4 热力学优化与计算过程.....	58
3.5 计算结果与讨论.....	58
参考文献.....	63
第四章 Fe-Si-(Ti, Nb)三元系相图的实验测定与热力学优化.....	74
4.1 引言.....	74
4.2 Fe-Si-(Ti, Nb)三元系的实验相图信息.....	74
4.2.1 基础二元系.....	74
4.2.2 Fe-Si-(Ti, Nb)三元系.....	81
4.3 Fe-Si-Ti 三元系相平衡的实验测定与热力学计算.....	81
4.3.1 实验方法.....	81
4.3.2 Fe-Si-Ti 三元系的实验结果与讨论.....	83
4.3.3 热力学优化与计算过程.....	92
4.3.4 计算结果与讨论.....	92
4.4 Fe-Si-Nb 三元系相平衡的实验测定与热力学计算.....	95
4.4.1 实验方法.....	95
4.4.2 Fe-Si-Nb 三元系的实验结果与讨论.....	97
4.4.3 热力学优化与计算过程.....	102
4.4.4 计算结果与讨论.....	102

参考文献.....	107
第五章 取向硅钢热力学数据库的初步建立及应用.....	109
5.1 引言.....	109
5.2 取向硅钢热力学数据库的初步建立	109
5.3 取向硅钢热力学数据库的应用.....	112
5.3.1 基础二元系相图的计算.....	113
5.3.2 三元系相图的计算.....	122
5.3.3 Fe-Si-C-N-X (Nb, Ti) 系热力学数据库在取向硅钢设计中的应用...	141
参考文献.....	148
第六章 结论.....	152
致谢.....	153
攻读硕士学位期间科研成果以及获得奖励.....	154

CONTENTS

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	II
CHAPTER 1 Introduction	1
1.1 Summaries of silicon steels	1
1.1.1 The development of the silicon steels abroad.....	2
1.1.2 The development of the silicon steels home.....	3
1.1.3 The role of inhibitor in the oriented silicon steels.....	4
1.1.4 The production of technics in the oriented silicon steels.....	6
1.2 Properties of oriented silicon steels	7
1.2.1 The effect of alloying elements (Fe, Si, C, N) in the properties of oriented silicon steels.....	8
1.2.2 The effect of alloying elements Nb and Ti in the properties of oriented silicon steels.....	10
1.3 Phase diagram and CALPHAD method	11
1.3.1 Phase diagram and its determination method.....	12
1.3.2 CALPHAD method.....	14
1.3.3 Introduction of thermodynamic models.....	20
1.4 Phase diagram of oriented silicon steels	24
1.5 Major purpose and content of this work	25
Reference	26
CHAPTER 2 Experimental methods and thermodynamic models ..	28
2.1 Experimental methods used in this work	28
2.1.1 The preparation of alloy samples.....	28
2.1.2 Heat treatment method.....	28
2.1.3 Observation of microstructures.....	29
2.1.4 Determination of alloy composition.....	29
2.1.5 Analyzation of structures by XRD.....	29
2.2 Thermodynamic models used in this work	29

2.2.1 Pure elements.....	30
2.2.2 Liquid and other solutions.....	31
2.2.3 Stoichiometric phases.....	32
2.2.4 Intermetallic compounds.....	33
Reference.....	37
CHAPTER 3 Experimental determination and thermodynamic assessment in the Fe-Nb-Ti ternary system.....	38
3.1 Introduction.....	38
3.2 Information on the Fe-Nb-Ti ternary system.....	38
3.2.1 Basic binary system.....	38
3.2.2 The Fe-Nb-Ti ternary system.....	46
3.3 Experimental investigation of phase equilibria in the Fe-Nb-Ti ternary system.....	46
3.3.1 Experimental method.....	46
3.3.2 Experimental results and discussion.....	49
3.4 Optimization procedure.....	58
3.5 Results and discussion.....	58
Reference.....	63
CHAPTER 4 Experimental determination and thermodynamic assessment in the Fe-Si-(Ti, Nb) ternary system.....	74
4.1 Introduction.....	74
4.2 Information on the Fe-Si-(Ti, Nb) ternary system.....	74
4.2.1 Basic binary system.....	74
4.2.2 The Fe-Si-(Ti, Nb) ternary system.....	81
4.3 Experimental investigation of phase equilibria in the Fe-Si-Ti ternary system.....	81
4.3.1 Experimental method.....	81
4.3.2 Experimental results and discussion in the Fe-Si-Ti ternary system.....	83
4.3.3 Optimization procedure.....	92
4.3.4 Results and discussion.....	92

4.4 Experimental investigation of phase equilibria in the Fe-Si-Nb ternary system.....	98
4.4.1 Experimental method.....	98
4.4.2 Experimental results and discussion in the Fe-Si-Nb ternary system... ..	100
4.4.3 Optimization procedure.....	105
4.4.4 Results and discussion.....	106
Reference.....	110
CHAPTER 5 Development of thermodynamic database of oriented silicon steel and its applications.....	114
5.1 Introduction.....	114
5.2 Development of thermodynamic database of oriented silicon steel.....	114
5.3 Applications of thermodynamic database of oriented silicon steel.....	117
5.3.1 Thermodynamic calculation of the binary system in this senary system.....	118
5.3.2 Thermodynamic calculation of the ternary system in this senary system.....	127
5.3.3 Applications in the design of oriented silicon steel.....	146
Reference.....	153
CHAPTER 6 Summary.....	157
Acknowledgements.....	158
Publications.....	159

第一章 绪论

1.1 硅钢概述

硅钢是含硅量在 3 wt.% 左右, 其它主要是铁的硅铁合金, 主要用作各种电机和变压器的铁芯以及其他电器部件, 是电力、电子和军事工业不可缺少的重要软磁合金。硅钢在磁性材料领域中产量和用量最大, 是一种节能的重要金属功能材料。根据具体的用途不同, 硅钢分为取向硅钢和无取向硅钢。取向硅钢是变压器最主要和关键的材料。

在发达的工业国家, 因变压器硅钢片铁损而耗费的电能, 约占总发电电量的 4 %左右^[1]。一个国家的电工钢产量与发电量成正比关系, 为了节能, 美国首先对变压器提出了“电力损耗评价制度”, 鼓励用更低铁损的取向硅钢制造变压器, 政府实行补贴政策。工业生产取向硅钢一直采用铸坯高温加热工艺, 以保证获得稳定的高磁性, 然而高温加热工艺存在一些缺点: (1) 化渣多, 烧损量达 5%, 成材率低; (2) 经常清理炉底, 产量降低; (3) 燃料费用高; (4) 炉子寿命短; (5) 制造成本高; (6) 产品表面缺陷多。近年来, 在全球能源紧缺, 环境问题日益严峻的背景下, 世界各大取向硅钢生产厂家都积极探索节能环保、降低成本的生产方法, 其中以低温板坯加热取代传统高温板坯加热的方法逐渐成为研究热点^[2]。人们在研究板坯低温加热时, 为保证抑制剂强度而加入了除硫化锰以外的如氮化物和晶界析出元素等其它析出物来强化抑制剂。因此, 如何通过添加微量的合金元素来降低板坯表面加热温度的同时, 又能作为辅助抑制剂, 以确保产生完善的二次再结晶课题, 已成为研发新型取向硅钢需要解决的关键问题^[3,4]。

作为金属功能材料的硅钢使用已有一百年历史, 但至今还没有完全可以取代硅钢的新材料。虽然铁基非晶合金的铁损低, 但饱和磁感应强度 B_s 也低, 设计 B_m 只有 1.2 ~ 1.3 T (取向硅钢 B_m 达 1.7 ~ 1.8 T), 合金带过薄, 叠片系数低, 制成的配电变压器体积大^[5]。非晶带磁致伸缩大, 约为 27×10^{-6} (取向硅钢约为 1×10^{-6}), 制成的变压器噪音大^[5]。再者, 用非晶带制造变压器的工艺完全改变, 非晶带也比取向硅钢更贵。但非晶合金的发展却更促进了日本取向硅钢的发展^[4]。

1.1.1 国外硅钢的发展现状

早在1882年,英国的冶金学专家哈德菲尔特 (R.A.Hadfield) 就开始研究硅钢^[6,7]。一个多世纪以来,硅钢的研究和应用也得到了长足发展,先后经历了热轧电工钢发展阶段、冷轧单取向硅钢发展阶段和高磁感取向硅钢发展阶段。在不同的发展阶段,都是通过改善工艺以降低铁损^[8]。

在1905年,美国就开始大规模生产热轧硅钢。这一阶段主要是考虑降低碳含量和提高硅含量来提高磁性,减轻磁时效,进一步降低铁损和改进绝缘膜^[9]。这种硅钢的铁损可比普通低碳钢低一半以上,但硅含量并非是可以无限制的提高。随着硅含量的增加,虽然可降低硅钢片涡流损耗,但同时也使得硅钢的硬度、拉伸强度、屈服点等呈直线增加,使硅钢变脆,不利于生产和应用,因此该方法受到了限制。

为了进一步降低硅钢的铁损及改善其冲片性和磁性,美国的高斯^[3](N.P.Goss)于1930年开始采用冷轧和退火方法制备硅钢,探索晶粒易磁化方向 [001] 平行于轧制方向排列的取向硅钢带卷制造工艺,并于1935年证实这种硅钢具有(110)[001] 织构,并由美国的 Armco 钢公司投入生产。该生产方法的最大特点是在热轧前于高温中加热板坯来提高取向性,并且使产品磁性稳定下来,从而取代热轧电工钢板。此后,美国的 ALC, USS, 英国的 BSC 及日本的八幡等长期垄断了世界冷轧取向硅钢的生产。与热轧硅钢片相比,其磁性能提高 30% 以上,损耗降低一倍。这是硅钢发展史上具有历史意义的重大突破。但从 1958 年到 1967 年间,普通取向硅钢的磁性基本处于稳定状态,产品铁损下降不到 0.05W/kg,只相当于提高半个牌号,在制造技术方面没有很大进展。为了进一步提高电工钢牌号,研究者们又进行了新的探索。

1953 年日本新日铁公司田中悟发现经一次大压下率冷轧和退火后,(110)[001] 取向度和磁性明显高于普通取向硅钢。1961 年首先试制 AlN + MnS 综合抑制剂的高磁感取向硅钢。于 1968 年正式生产 Z8H 牌号,先后耗时约 15 年时间。新日铁的高磁感取向硅钢专利先后卖给了美国 Armco (1971年)、前西德 Thyssen (1972年)、中国武钢、比利时 Cockerill 和法国 Chatillon (1974年) 及英国 BSC (1975年) 等钢铁公司。以后的发展都是通过减薄等手段来提高高磁感取向硅钢性能的^[8]。经过不懈努力,1985年后,取向硅钢的主要性能指标——铁损已经降低到一百年前的二十分之一^[8]。取向硅钢的发展历史实际上是铁损逐

步降低的历史，图1.1^[8]是历年来工业生产的取向硅钢最高牌号的平均铁损 $P_{15/50}$ 降低情况。

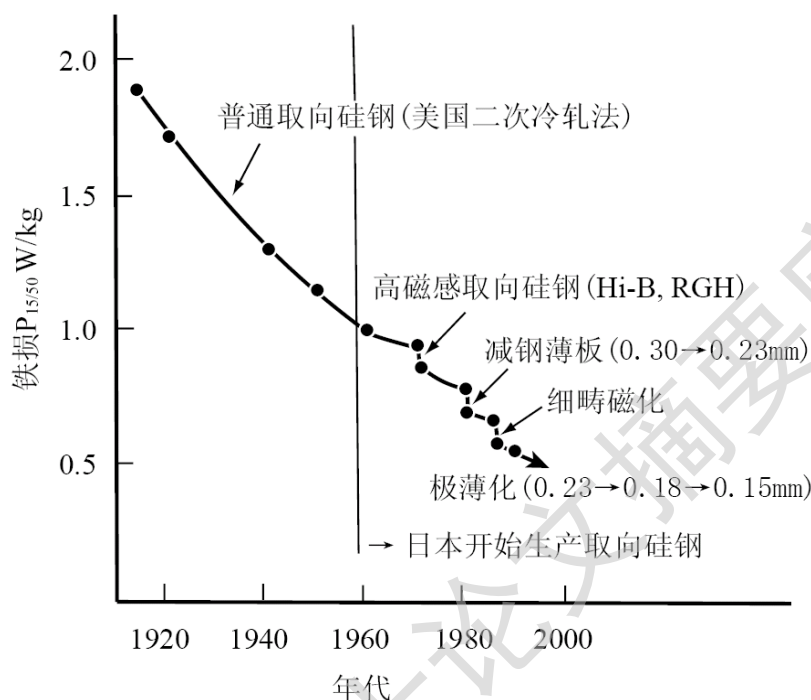


图 1.1 历年来取向硅钢的铁损降低情况

Fig 1.1 The descending iron loss of the oriented silicon steel

1.1.2 国内硅钢的发展现状

中国硅钢发展至今已有 50 多年的历史，1952 年太原钢铁厂首先试制热轧低硅钢板 (1%~2%Si)^[8]。1954 年太原钢铁厂与冶金部钢铁研究院合作试制成热轧高硅钢板 (3%~4%Si)，1956 年正式生产。1957 年，冶金部首先制成了 (110)[001] 取向硅钢，1959 年太原钢铁厂和鞍山钢铁公司先后开始试生产取向硅钢^[8]。1960 年上海矽钢片改变了热轧硅钢传统制造工艺，采用一次加热轧制法^[8]；1963 年采用氢气退火。通过工艺的改进，热轧硅钢产量和质量都明显提高。1974 年武汉钢铁公司与日本新日铁公司签定了年产量为 6.8 万 t 和 11 个牌号冷轧硅钢专利技术及制造设备协议。

截止到2007年年底，国内仅有武钢能够生产取向硅钢。2008年开始，鞍钢和宝钢先后开始生产取向硅钢，从而打破了武钢在这个领域的垄断优势。鞍钢取向硅钢计划于2008年下半年投产，设计规模为年产26万吨。宝钢2008年7月取向硅钢投产，2009年第一期工程达到10万吨产能。2008年我国共生产取向硅钢33.9万

吨，满足国内48%的市场需求，进口取向硅钢达到了35.3万吨，而国内取向硅钢出口平均在0.1万吨/年左右。

国内取向硅钢面临着国外对手的激烈竞争。目前，国内只有武钢和宝钢能生产取向硅钢，鞍钢才开始试生产，高牌号取向硅钢尤其是激光刻痕 Hi-B 钢不能满足市场需求，很大一部分市场份额一直被新日铁、JFE、浦项等国外企业占领着。我国必须加快高牌号取向硅钢的开发力度。

1.1.3 取向硅钢中抑制剂的作用

在取向硅钢生产工艺中，为了控制再结晶过程，并获得一定的织构，抑制剂是必不可少的^[3]。为使 (110)[001] 位向的二次再结晶晶粒得到发展，则须有析出物在钢中弥散分布，有效控制二次再结晶退火中其它位向的再结晶晶粒正常长大，通过加强抑制力来提高高斯位向的密集度，这些析出物称之为抑制剂。抑制相的存在，严重的损害成品硅钢片的磁性能，因此，抑制剂的选用须具备 2 个条件：

(1) 细小的弥散抑制剂平均分布或富集于初次晶粒晶界；

(2) 二次再结晶开始温度在 900℃ 左右，随着温度的升高，抑制剂产生 Ostwald 效应，在一定气氛下，高温退火时 (1100 ~ 1200℃) 抑制剂以溶解或者挥发方式予以去除^[3]。

取向硅钢片中的化合物抑制相主要包括：MnS、AlN、MnTe、MnSe、TiN、NbN 等析出相。表 1.1 给出了抑制相各自的特征参数。

表 1.1 化合物抑制相的有关参数

Table 1.1 Parameters related to compound inclusion restraint phases

类别	固溶温度/℃	沉淀析出处理	终退火净化气氛	净化温度/℃	元素含量 wt.%
MnS	1280~1350	900~1000℃ 热轧和随后冷却	干氢	>1200	Mn=0.06~0.10 S=0.018~0.025
AlN	1250~1300	950~1200℃ 急冷却	干氢中性还原	1150~1200	Al=0.03~0.025 N=0.008~0.013
MnTe	1150~1200	热轧和随后急冷	干氢	1150	Mn=0.04~0.15 Te=0.036~0.08
MnSe	1360	冷轧前 1050℃ 沉淀处理	干氢还原气体	1150	Mn=0.045~0.07 Se=0.02~0.08
TiN	1250~1350	热轧和随后急冷	N + H	1000~1300	Ti=0.01~0.10 N=0.02~0.08
NbN	1350	热轧和随后急冷	2/3N+1/3H 干氢	1100~1150	Nb=0.10~0.15 N=0.002~0.003

1.1.4 取向硅钢的生产工艺

取向硅钢是一种生产工艺复杂、生产周期至少长达 15 天左右的产品。在过去几年中,为了简化生产工艺、缩短生产周期、降低取向硅钢的生产成本,几乎所有的生产厂都希望追求更紧凑、更廉价的生产工艺^[2]:包括采用板坯低温加热工艺代替传统的高温板坯加热工艺,采用薄板坯连铸连轧、薄带连铸工艺代替传统的连铸厚板坯——热轧工艺、用连续退火取代罩式退火^[2]。

在取向硅钢生产中,最关键的是抑制剂问题。抑制剂有 2 种添加思路:(1) 抑制剂是在炼钢和热轧过程中形成的,都需要将热轧板坯再加热至大于 1300℃,所以将这种已经存在热轧钢带中的抑制剂称为内在的抑制剂。(2) 抑制剂是在硅钢生产的后工序加入,原始板坯因没有高熔点的抑制剂元素,则更容易在 1150~1200℃的较低温度加热,由此代替了传统工艺在 1400℃加热的工艺路线。两种抑制剂的添加思路,形成了两种不同的生产工艺路线。一是传统工艺,即板坯高温加热工艺 (1400℃),包括了阿姆科 (Armco) 法、新日铁法和川崎法,工艺流程如表 1.2 所示^[10]。二是开发的新工艺,后添加抑制剂生产技术。目前,这种板坯低温加热工艺的思路是:二次再结晶所必需的抑制剂全部在硅钢生产的后工序加入。即在脱碳退火线上 (脱碳退火的后段),向退火炉气氛中注入氨气 (NH_3) 进行渗氮,或在涂退火隔离涂层工序中加入含硫或氮的化合物 (MnN 、 CrN 化合物),或者在罩式炉退火气氛中采用较高的氮含量来有效地加强这种抑制作用。通过在二次再结晶之前进行渗氮处理,就能形成足够的 (Al , Si) N 抑制剂,以确保产生完善的二次再结晶。该工艺板坯表面加热温度从 1400℃降至 1300℃以下,避免了液态炉渣的形成,增加了材料收得率,减少了炉子的频繁维修^[11]。因此,今后传统的铸坯高温加热制度将会逐步被中温和低温加热制度所替代。

表 1.2 取向硅钢生产工艺流程

Table 1.2 The flow of oriented silicon steel produced

生产方法	生产工艺
阿姆科法 (CGO)	炼钢(Mn, S 或 Se)→热轧(板坯再加热 $T>1300^{\circ}\text{C}$)→常化退火→一次冷轧→中间退火→二次冷轧(减薄 50%)→脱碳→最终退火→热平整, 涂层
新日铁法 (Hi-B)	炼钢(Al, N, Mn, S, Sn)→热轧(板坯再加热 $T>1300^{\circ}\text{C}$)→高温退火→高速冷轧(减薄 87%)→脱碳→最终退火→热平整, 涂层
川崎法 (RG-H)	炼钢(Mn, Se 或 S, Sb)→热轧(板坯再加热 $T>1300^{\circ}\text{C}$)→常化退火→一次冷轧→中间退火→二次冷轧(减薄 65%)→脱碳→最终退火→热平整, 涂层

1.2 取向硅钢的性能特点

取向硅钢主要用于制造变压器铁芯, 是影响国家电力传输效率的重要战略性原材料。它是在工业纯铁的基础上发展起来的, 它的主要优点是: (1) 具有良好的磁性, 饱和磁化强度高, 电阻率较高, 矫顽力低和铁损小; (2) 硅促进钢中的碳石墨化, 减少了钢板之间的黏结以及磁时效 (磁性随时间的延长而下降) 现象; (3) 与其他软磁材料相比, 硅钢片具有更高的性能稳定性, 适于在高温、高压、振动和冲击等特殊环境中使用; (4) 价格便宜, 生产工艺成熟, 适于工业上大规模生产。

取向硅钢的质量优劣可以从电磁性能、表面性能、尺寸精度和机械性能四方面来衡量。电磁性能是取向硅钢所有性能中最重要的, 决定着变压器的性能。电磁性能主要看两个指标, 一个是磁化强度 (磁感)。通常在频率 50 Hz, 最大磁场强度 800 A/m 的磁场下测量, 简写为 B_8 , 单位为 T。根据 B_8 的高低, 取向硅钢分为普通取向硅钢和高磁感取向硅钢两大类, 前者的 B_8 实际值在 1.80~1.85 T; 后者 B_8 实际值在 1.88~1.93 T。另一个表征电磁性能的重要指标是铁损, 即在特定磁场中单位重量取向硅钢造成的能量损耗。一般在 1.7 T 的磁极化强度和 50 Hz 频率下测量, 简写为 $P_{17/50}$, 单位为 W/kg。铁损是决定取向硅钢牌号等级的主要

指标。在 B_8 达到一定要求的情况下，根据铁损的水平判定取向硅钢牌号。目前市场上铁损最优良的取向硅钢产品，是经过激光刻痕处理的薄规格高磁感取向硅钢， $P_{17/50}$ 可以降低到 0.80 W/kg 左右。取向硅钢在变压器中是叠装后使用的，所以除了电磁性能，还需要有良好的板间绝缘性。为取向硅钢提供绝缘性的，是基体表面的硅酸镁底层和绝缘涂层。取向硅钢优质成品的表面呈灰色且带光泽，灰色的物质就是高温下硅钢基体与涂覆在表面的氧化镁反应形成的硅酸镁底层，产生光泽的主要是绝缘涂层，绝缘涂层是在硅酸镁底层形成后，再涂覆上去的一层接近透明的涂层，为产品增添了绝缘性能。通常表征产品绝缘性的指标是层间电阻。同时也要检测产品底层和涂层在基体上的附着性，保证产品在加工、组装过程中，两层绝缘物质不会剥落。叠片系数是取向硅钢表面质量的另一个重要指标。它主要表征取向硅钢在叠装成一定体积的铁芯后，硅钢所占有的实际体积（剩下的体积为叠片中的间隙）。这个比例越高越好，一般要在 95.5% 以上。而决定叠片系数的，是表面平整度、同板差、不平度，边部剪切质量等产品尺寸精度。取向硅钢的机械性能指标主要包括钢板纵横向的抗拉强度、屈服强度、纵横向的延伸率、反复弯曲次数、硬度等。由于取向硅钢含硅量高、生产工艺比较固定，其机械性能也比较稳定，在经过产品验证后一般可作为免检指标。

1.2.1 基本合金元素 (Fe、Si、C、N) 的作用

硅钢和其它金属材料一样，其磁性性能主要由其内部组织结构所控制，众所周知，组织结构的确立又与其合金元素密切相关，织构、金属间化合物的形成及析出，合金元素的偏析等将对硅钢的铁损和磁感应强度产生重要影响。硅钢的牌号不同，其化学组成也不同，基本合金元素即：Fe、Si、C 和 N。

铁元素是元素周期表中第 26 号元素，其原子序数为 26，原子量为 55.845，化学符号为 Fe。铁矿石是地壳主要组成成分之一，目前，磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿和菱铁矿是重要的铁矿。金属铁呈现银白色的金属光泽，硬而有延展性，有很强的铁磁性，并有良好的可塑性和导热性。表 1.3 为高纯铁的物理性能^[8]。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库